

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14832

研究課題名(和文)酸素オーバーシュート仮説の検証

研究課題名(英文)Examination of the oxygen overshoot hypothesis

研究代表者

後藤 孝介(Goto, Kosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：30612171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：原生代前期における大気進化を理解するために、カナダ・ヒューロニアン累層群サーペント層のモリブデン同位体分析を行った。サーペント層のモリブデン同位体比は、 -0.06 から 0.32‰ の値を示し、太古代や原生代前期の氷河性ダイアミクタイトから制約されている上部大陸地殻の値($0.03 \pm 0.18\text{‰}$)と概ね一致した。このことは、サーペント層が堆積する際に、酸化的風化が起きていなかったことと解釈することが可能であり、少なくとも23.5億年前までは、大気酸素濃度が低いレベルで推移していたこと示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球大気の化学組成が地球史を通じてどのように変化してきたのかは、生命の進化と密接に関係している。本研究により、23.5億年前の堆積物の化学分析に基づき、この時代の大気酸素濃度が低かった可能性が明らかとなった。得られた知見は、原生代前期におきた大気酸素濃度上昇イベント(大酸化イベント)と酸素発生型光合成生物や真核生物の進化・出現の関係を理解する一助になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To further understand the atmospheric redox conditions during the early Paleoproterozoic, we analyzed Mo isotopic compositions ($^{98}/^{95}\text{Mo}$) of ~ 2.35 -Gyr-old clastic sedimentary rocks from the Serpent Formation in the Huronian Supergroup. The $^{98}/^{95}\text{Mo}$ values of the analyzed samples range between -0.06 and 0.32‰ and are similar to the average Archean upper continental crust $^{98}/^{95}\text{Mo}$ ($+0.03 \pm 0.18\text{‰}$) estimated from Archean and early Paleoproterozoic glacial diamictites (Greaney et al., 2020 EPSL 534, 116083). The unfractionated $^{98}/^{95}\text{Mo}$ values require limited oxidative weathering of Mo as well as little authigenic Mo enrichment during deposition. Our results, therefore, suggest low atmospheric O_2 conditions at ~ 2.35 Ga and support the oscillations in atmospheric O_2 levels after its initial rise at ~ 2.43 Ga.

研究分野：古環境学

キーワード：大酸化イベント オーバーシュート仮説 原生代前期 モリブデン同位体 大気進化

1. 研究開始当初の背景

原生代前期 (25-20 億年前) は、酸素濃度が 10^{-6} atm 以下から 10^{-2} atm 以上へ増加するイベント (大酸化イベント) が起きた時代として知られている (e.g., Holland, 2006 *Phil. Trans. R. Soc. B*; 図 1). 原生代前期には、多細胞真核生物のものと思われる化石も報告されており、この時代の大酸化イベントと生命進化のリンケージも提唱されている (Albani et al., 2010 *Nature*; 図 1). しかし、多細胞真核生物の進化・多様化は、約 8 億年前に起きたと考えられており、出現から多様化までに 10 億年以上の時間がかかった理由が明らかではない。

近年、原生代前期に出現した酸素に富む大気環境は安定ではなく、約 20 億年頃には、再び酸素濃度が 10^{-2} atm 以下に減少した可能性が近年提唱された (オーバーシュート仮説; e.g., Lyons et al., 2014 *Nature*; 図 1). 酸素のオーバーシュートが起きた場合、多細胞真核生物の出現から多様化までに 10 億年以上かかった原因が、低酸素環境の再出現により説明できる可能性がある。様々な手法に基づき、原生代前期における大気進化の描像を明らかにし、オーバーシュート仮説の検証、さらには真核生物の進化に対する影響を解明していくことが課題である。

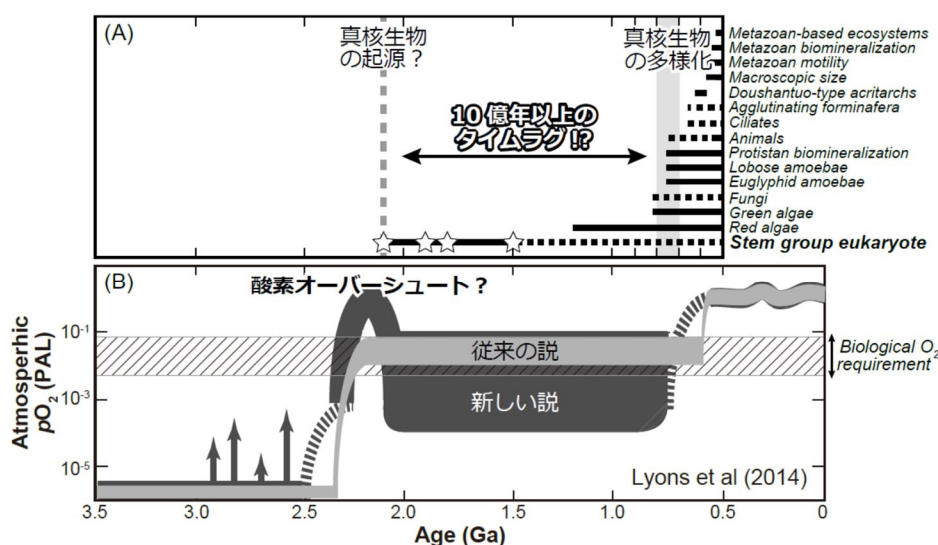


図 1. (A) 真核生物の出現 (約 21 億年前)と多様化 (約 8 億年前)の様子。

(B) オーバーシュートを考慮した大気進化の描像 (淡灰色; 従来の説, 濃灰色; 新しい説)

2. 研究の目的

本研究では、真核生物の進化の偶然性・必然性の理解を最終的な目標に、原生代前期における酸素オーバーシュート仮説の検証を行う。原生代前期の浅海性堆積岩・古土壌のコア試料を対象に、系統的なモリブデン安定同位体 ($^{98/95}\text{Mo}$) およびレニウム-オスミウム (Re-Os) 同位体分析を行う。 $^{98/95}\text{Mo}$ に基づく大陸地殻の酸化的風化を議論する方法を確立し、原生代前期における地球表層の酸化還元変動を復元することを目的とする。

3. 研究の方法

カナダ・ヒューロニアン累層群, フィンランド・カレリア累層群, ガーナ・プリミアン累層群より採取されたコア試料を対象に化学分析を行った。特にカナダ・ヒューロニアン累層群では、サーベント層における硫黄同位体などの情報が共同研究者により得られており、重点的に分析を行った。まず、分析試料の基礎情報取得を念頭に、走査型電子顕微鏡 (HITACHI SU-3500) などによる薄片観察や誘導結合プラズマ質量分析装置 (Agilent 7500cx) を用いた微量元素分析を産業技術総合研究所において行った。モリブデン同位体比は、ダブルスパイク法とマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置 (MC-ICP-MS; Thermo Fisher Scientific Neptune) に基づき、産業技術総合研究所において分析した。フッ酸などで分解した溶液試料よりモリブデンを分離するために、陰イオン・陽イオン交換樹脂を用いた。特に陽イオン交換は、試料溶液に含まれる鉄を十分に除去するために 2 回繰り返した。また分析試料のモリブデン濃度が低いため、閉鎖系の蒸発・乾固システム (ANALAB 社製 Evapoclean) を導入し、環境中からの汚染が起らない条件で蒸発・乾固を行えるようにした。

4. 研究成果

カナダ・ヒューロニアン累層群サーベント層の砂岩試料のモリブデン同位体比は -0.06 から 0.32% の値を示し、ガーナ・プリミアン累層群の砂岩試料は -0.8 から 0% と低い値を示した (図 2)。フィンラン

ド・カレリア累層群より採取されたホカランピ古土壌は、酸ブランクと同程度しかモリブデンを含んでおらず、精度の高い分析が不可能であった。カナダ・ヒューロニアン累層群の同位体比は、太古代や原生代前期の氷河性ダイアミクタイトより制約されている上部大陸地殻のモリブデン同位体比 ($0.03 \pm 0.18\text{‰}$) と概ね一致していた。このことは、サーペント層が堆積した約 23.5 億年前の地球表層では、酸化的風化が起きない還元的な大気環境が広がっていた可能性を示唆する。この発見は、共同研究者が取得したサーペント層の硫黄同位体の情報とも調和的であり、また本研究で確認した碎屑性と見られる硫化物の存在とも調和的である (図 3)。一方で、プリミアン累層群の低い同位体比は、約 22 億年前にはモリブデンの酸化的風化が起きていたと解釈可能である。得られた結果は、少なくとも 22 億年前には酸素濃度の上昇が起きていたことを示唆し、プリミアン累層群のマンガン堆積物より示唆されている酸化的な海洋環境の存在とも調和的である (Goto et al., 2021 Chem. Geol.)。しかし、プリミアン累層群の砂岩試料に関しては、堆積環境が必ずしも十分制約出来ておらず、海底熱水による変質の影響も否定できない。

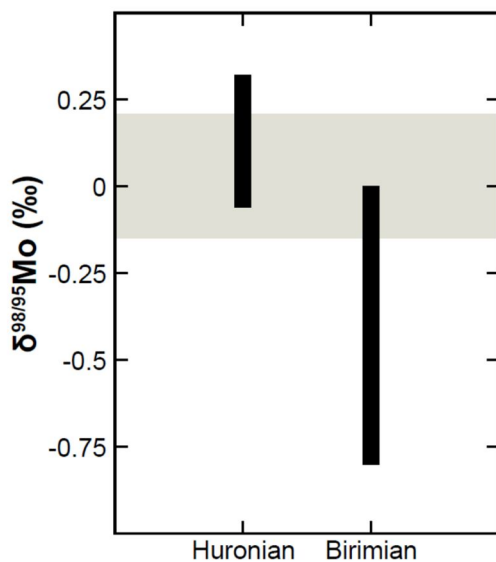


図 2. モリブデン同位体比の結果 (灰色: 上部大陸地殻の同位体比)

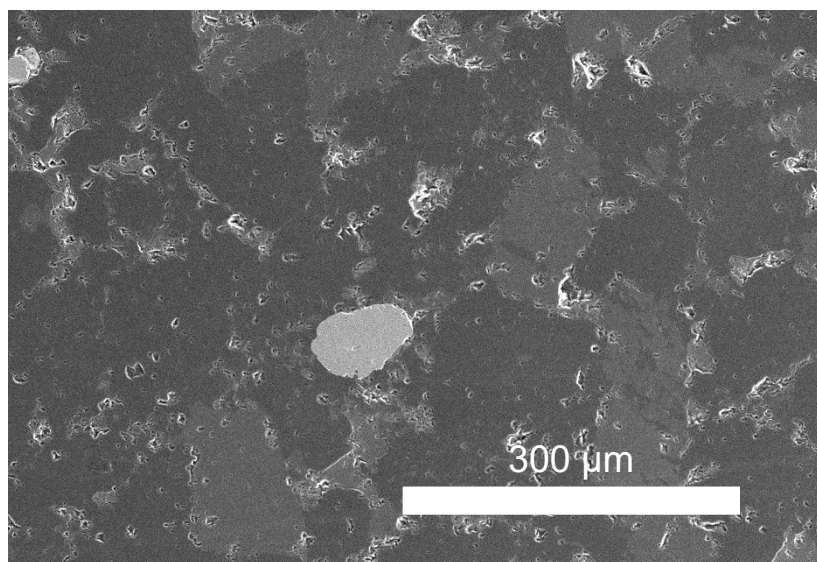


図 3. サーペント層における硫化物の産状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Dey Sumit, Dasgupta Prabir, Das Kaushik, Goto Kosuke T., Matin Abdul, Suzuki Katsuhiko, Kubota Masahiro	4. 巻 141
2. 論文標題 Krol Sandstone-black shale association of the Lesser Himalayan Neoproterozoic succession, Himachal Pradesh, India: An unexplored record of the hothouse aftermath	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Marine and Petroleum Geology	6. 最初と最後の頁 105723 ~ 105723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marpetgeo.2022.105723	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Goto Kosuke T., Tejada Maria Luisa G., Tajika Eiichi, Suzuki Katsuhiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Enhanced magmatism played a dominant role in triggering the Miocene Climatic Optimum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-023-00684-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kosuke T. Goto, Yasuhito Sekine, Takashi Ito, Katsuhiko Suzuki, Ariel D. Anbar, Gwyneth W. Gordon, Yumiko Harigane, Teruyuki Maruoka, Gen Shimoda, Teruhiko Kashiwabara, Yutaro Takaya, Tatsuo Nozaki, James R. Hein, George M. Tetteh, Frank K. Nyame, Shoichi Kiyokawa	4. 巻 567
2. 論文標題 Progressive ocean oxygenation at ~2.2 Ga inferred from geochemistry and molybdenum isotopes of the Nsuta Mn deposit, Ghana	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Goto Kosuke T., Sekine Yasuhito, Shimoda Gen, Hein James R., Aoki Shogo, Ishikawa Akira, Suzuki Katsuhiko, Gordon Gwyneth W., Anbar Ariel D.	4. 巻 280
2. 論文標題 A framework for understanding Mo isotope records of Archean and Paleoproterozoic Fe- and Mn-rich sedimentary rocks: Insights from modern marine hydrothermal Fe-Mn oxides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 221 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.04.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 後藤孝介、下田玄
2. 発表標題 Limited Mo isotopic fractionation in ~2.35-Gyr-old clastic sedimentary rocks in the Huronian Supergroup
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤孝介、下田玄
2. 発表標題 カナダ・ヒューロニアン累層群における23.5億年前の砕屑性堆積岩のMo同位体比組成
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------